

– потери от дорожно-транспортных происшествий;

– экономическая оценка времени пребывания пассажиров в пути.

С точки зрения экономической эффективности оптимальным считается вариант, которому соответствует минимальная сумма дисконтированных затрат. Если имеются варианты, сумма дисконтированных затрат которых незначительно отличается от минимальной, возможен выбор рекомендуемого к реконструкции варианта с использованием дополнительных критериев, например, уровня обеспечения безопасности движения, возможностей организации строительных работ и др.

#### Список литературы:

1. Бабков В.Ф. Реконструкция автомобильных дорог. – М.: Высшая школа, 1973. – 212 с.

2. Указания по определению экономической эффективности капитальных вложений в строительство и реконструкцию автомобильных

дорог: ВСН 21-83 Минавтодора РСФСР. – М.: Транспорт, 1985. – 126с.

3. Муртазин Б.С., Токарев А.А. Оценка влияния ширины проезжей части горных дорог на относительную аварийность. – В кн.: Совершенствование методов проектирования автомобильных дорог. Сб. науч. тр. / МАДИ. – М., 1985. – С.65-71.

4. Ахмедова Р.К., Селимханов Д.Н., Абдуллаев А.Р. Основные проблемы при реконструкции горных дорог // Актуальные вопросы развития транспортной системы: сб. науч. трудов по мат. I - Междунар. науч.-практ. конференции. – Махачкала: МФ МАДИ, 2015. – С.95-98.

5. Ахмедова Р.К., Селимханов Д.Н., Абдуллаев А.Р. Исследование скоростей и безопасности движения на горных автомобильных дорогах республики Дагестан // Транспортное дело России. - 2017.- №4. - С.79-81.

6. Ахмедова Р.К. Обоснование ширины проезжей части и обочин при реконструкции горных дорог (в условиях Республики Дагестан): дисс...канд.техн.наук. – М.: МАДИ, 2006.

### МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИЗМЕРЕНИЮ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ДОЗ ОБЛУЧЕНИЯ НЕЙТРОННЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ ПЕРСОНАЛА БАЛАКОВСКОЙ АЭС

DOI: [10.31618/ESU.2413-9335.2020.4.73.673](https://doi.org/10.31618/ESU.2413-9335.2020.4.73.673)

**Алексеев Александр Григорьевич**

старший научный сотрудник,

«НИИ Курчатowski институт»-ИФВЭ,

г.Протвино

**Алексеев Павел Александрович**

старший научный сотрудник, ктн

АО «ГНЦ РФ-ФЭИ»

**Пикалов Владимир Александрович**

Ведущий инженер,

«НИИ Курчатowski институт»-ИФВЭ,

г.Протвино

### METHODOLOGICAL RECOMMENDATIONS FOR MEASUREMENT INDIVIDUAL EQUIVALENT DOSES OF IRRADIATION BY NEUTRON RADIATION OF STAFF OF BALAKOV NPP

**Alexeev A.G.**

NRC «Kurchatov Institute» – IHEP

**Alexeev P.A.**

JSC "SSC RF – IPPE"

**Pikalov V.A.**

NRC «Kurchatov Institute» – IHEP

#### АННОТАЦИЯ

На основании экспериментальных данных и расчета приведены поправочные коэффициенты для дозиметров, используемых для индивидуального дозиметрического контроля на Балаковской АЭС.

#### ABSTRACT

The experimental and calculated results of determining correction factors for dosimeters used for individual dosimetric monitoring at the Balakovo NPP are presented.

**Ключевые слова:** нейтроны, индивидуальный эквивалент дозы, спектр, дозиметр, реактор, АЭС

**Keywords:** neutrons, spectrum, dosimeter, reactor, NPP

#### ВВЕДЕНИЕ

Публикация обновленных рекомендаций [1], [2], [3] по методическому обеспечению

радиационного контроля в атомной отрасли вызвало необходимость уточнения и актуализации методик измерения, используемых на



предприятиях отрасли. Данная работа рассматривает методические вопросы измерения индивидуальных эквивалентных доз облучения нейтронным излучением персонала Балаковской АЭС.

Цель разработки и использования методик измерения – обеспечить результат измерения с погрешностью (неопределенностью) не выше нормативных требований. Один из рекомендованных способов – уменьшение погрешности измерения индивидуальных эквивалентных доз персонала с помощью дозиметров является использование поправочного коэффициента, величина, которого зависит от спектра нейтронов в месте облучения. В данной работе представлены результаты определения поправочных коэффициентов для средств измерений используемых на Балаковской АЭС.

### МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ

Для текущего дозиметрического контроля на Балаковской АЭС используются:

- автоматизированные термолюминесцентные считыватели Harshaw 6600 Lite с дозиметрами типа 6776/8806 для измерения индивидуального эквивалента дозы нейтронного излучения;

- для оперативного дозиметрического контроля: индивидуальный прямопоказывающий дозиметр DMC2000GN;

- для оперативного контроля радиационной обстановки дозиметр-радиометр MKC-AT1117.

Определение поправок для используемых средств измерения (СИ) на Балаковской АЭС для измерения индивидуального эквивалента дозы выполнялось двумя способами:

- расчетным способом: используя результаты измерения спектров нейтронов на рабочих местах [4];

- экспериментально: на рабочих местах выполнялось измерение амбиентного эквивалента дозы нейтронов  $H^*(10)$ , затем в той же точке проводилось облучение дозиметров 6776/8806 и DMC2000GN на тканеэквивалентном фантоме.

Для измерения  $H^*(10)$  использовался ДКС96Н с блоком детектирования БДМН-96 и стандартным замедлителем.

### ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Индивидуальный дозиметр 6776/8806 является нейтронным альбедным типом, в состав которого входят термолюминесцентные детекторы типа ТЛД600 и ТЛД700. Исследованию энергетической зависимости альбедных дозиметров в различных полях нейтронов посвящено множество работ. Так в работе [7] было экспериментально показано, что альбедные дозиметры 6776/8806 и ДВГН-01 имеют одинаковую чувствительность в разных спектрах нейтронов. Это позволяет использовать расчетную энергетическую зависимость чувствительности ДВГН-01 для оценки поправочного коэффициента дозиметра 6776/8806.

Электронный прямопоказывающий дозиметр DMC2000GN имеет комбинированный детектор (альбедный + детектор быстрых нейтронов). Исследованию характеристик данного дозиметра посвящено так же достаточно много работ[7-11].

Дозиметр-радиометр MKC-AT1117 широко используется на предприятиях Росатома для обследования радиационной обстановки. Для уточнения энергетической зависимости чувствительности были выполнены расчеты по программе MCNP[12]. Геометрия расчета энергетической зависимости чувствительности к нейтронам с помощью программы MCNP приведена на рисунках 1 и 2. Размеры, конструкцию и используемые материалы в замедлителях дозиметров-радиометров нейтронов предоставили производители средств измерений. Геометрия замедлителя ДКС96Н – сферическая, материал –полиэтилен; внутри полиэтиленового замедлителя – сферический слой из кадмия толщиной 1 мм; детектор- компаунд из органического материала с сцинтиллятором ZnS и активатором Li6.

Геометрия замедлителя MKC1117 – цилиндрическая, материал –полиэтилен; внутри полиэтиленового замедлителя – слой из борированного полиэтилена (тип полиэтилена БП-5 (содержание аморфного бора-5%)) толщиной 10 мм; детектор- гелиевый счетчик.



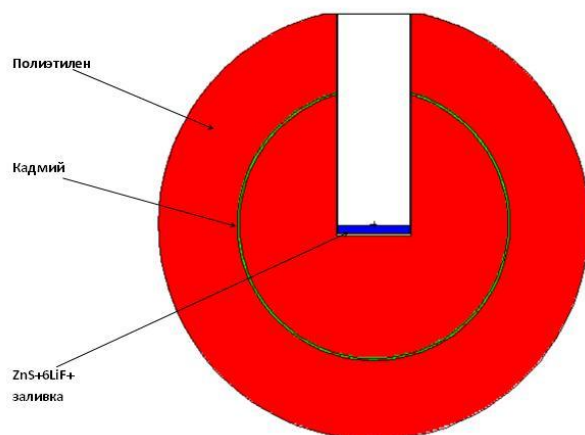


Рис. 1 – Геометрия расчета для блока детектирования дозиметра радиометра ДКС96Н.

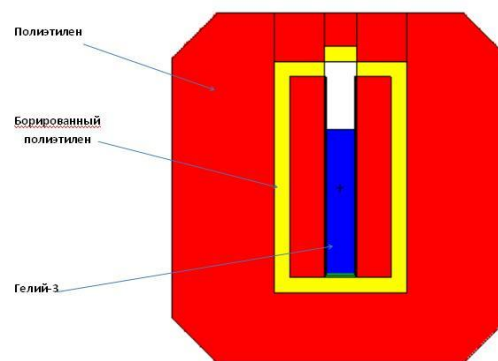


Рис. 2- Геометрия расчета для блока детектирования дозиметра радиометра МКС-АТ1117.

Результаты расчета энергетической зависимости к нейтронам дозиметров ДКС96Н и МКС АТ1117 приведены на рисунке 3 и 4.

Основные замечания:

-чувствительность зависит от направления падения нейтронов; при этом у МКС-АТ1117 разница выше, чем у ДКС96Н;

- при энергиях ниже 0,1 МэВ чувствительность ДКС96Н выше, чем у МКС-АТ1117.

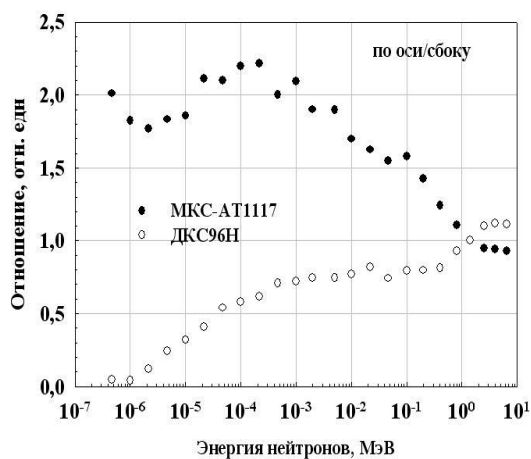


Рис. 3- Энергетическая зависимость отношения чувствительности по оси/сбоку. «По оси» - направление пучка нейтронов по оси замедлителя, «сбоку» - направление пучка нейтронов перпендикулярно оси замедлителя.

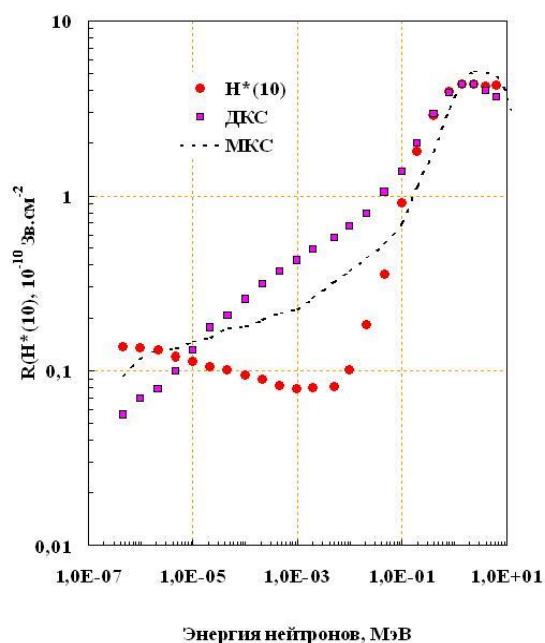


Рис. 4- Энергетическая зависимость МКС-АТ1117 и ДКС96Н. направление - «с боку» - .  $H^*(10)$  – зависимость амбиентного эквивалента дозы нейтронов.

В данной работе определялись поправки для дозиметров для измерения индивидуального эквивалента дозы для трех видов работ персонала Балаковской АЭС (и соответственно три разных поля нейтронов), когда возможно облучение нейтронным излучением:

- осмотр оборудования в помещениях гермообъема (ГО) при работе реакторной установки на мощности;

- работы в помещениях, где находятся нейтронные радионуклидные источники нейтронов (типа ИБН-7 или ИБН-9) – работы по наладке и настройке концентраторов бора;

- вывоз и хранение отработанного ядерного топлива (ОЯТ), работа рядом с транспортным контейнером (ТК-13) с ОЯТ.

Описание точек измерения и помещений, где проводились измерения приведены в работе[4].



Поправочный коэффициент  $F$  для дозиметров используется для того, что бы от показаний дозиметра  $H$  (например, дозиметр отградуирован в спектре нейтронов источника  $Pu-Be$  в установке УКПН), перейти к значению индивидуального эквивалента дозы.

$$H_p(10) = F \times H$$

Поправка  $F$  рассчитывается следующим образом:

$$q_s = \frac{\int F_s(e) \cdot R(E) \cdot dE}{\int F_s(e) \cdot h_p(E) \cdot dE}$$

$$q_{Pu-Be} = \frac{\int F_{Pu-Be}(e) \cdot R(E) \cdot dE}{\int F_{Pu-Be}(e) \cdot h_p(E) \cdot dE}$$

$$F = \frac{q_{Pu-Be}}{q_s}$$

где  $F_{Pu-Be}$  и  $F_s$  – спектр нейтронов  $Pu-Be$  источника и измеренный спектр соответственно.

Значения  $R(E)$  и  $h_p(E)$  – энергетическая зависимость чувствительности дозиметра и энергетическая зависимость удельного индивидуального эквивалента дозы нейтронов.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

В таблице 1 приведены измеренные и расчетные величины поправок для дозиметров 6776/8806 и в таблице 2 экспериментальные данные для DMC2000GN. Там же приведена средняя энергия нейтронов для спектра нейтронов с энергией выше 0,4 67 эВ (выше кадмиевой границы); эта величина взята для сравнения с результатами из работы [7]. В работе [7] спектр нейтронов измерялся без учета вклада тепловых нейтронов. Поэтому при сравнении данных из таблицы 1 (помещение настройки концентратометров) при незначительном различии средних энергий (2 и 1,5 МэВ), поправочный коэффициент сильно различается (1,06 и 0,11), что обусловлено разным вкладом тепловых нейтронов. На рисунках 5 и 6 приведены зависимости поправок для этих дозиметров от средней энергии нейтронов в спектре полученные в работе [7]. Данные настоящей работы находятся в согласии с результатами работы [7]. В таблице 3 приведены расчетное и измеренное отношение показаний дозиметров радиометров ДКС96Н и МКС-АТ1117.

Таблица 1.

**Величины поправочных коэффициентов для дозиметров 6776/8806**

| место измерения   | расчет поправки $F$ по спектру нейтронов | измеренная величина $F$ | средняя энергия, МэВ |
|---|--|-------------------------|----------------------|
| ГО – Помещение машины осмотра корпуса реактора;                       | 0,082                                    | 0,11                    | 0,156                |
| ГО помещение, рядом с ГЦНА  | 0,086                                    | 0,1                     | 0,163                |
| помещение настройки концентратометров бора в 60 см от источника       | 0,7                                      | 1,06                    | 2                    |
| помещение настройки концентратометров бора настройки на рабочем столе | 0,25                                     | 0,11                    | 1,5                  |

Таблица 2.

**Величины поправочных коэффициентов для дозиметров DMC2000GN**

| место измерения   | измеренная величина $F$ | средняя энергия, МэВ |
|---|-------------------------|----------------------|
| ГО – Помещение машины осмотра корпуса реактора;                               | 1,8                     | 0,156                |
| ГО помещение, рядом с ГЦНА  | 2,7                     | 0,163                |
| Помещение ( спецкорпус) настройки концентратометров бора в 60 см от источника | 0,92                    | 2                    |
| помещение (спецкорпус) концентратометров бора настройки на рабочем столе      | 1,2                     | 1,5                  |



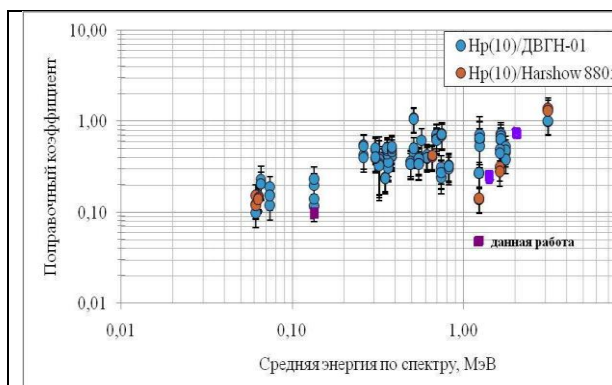


Рис.5- Поправочные коэффициенты для термолюминесцентных альбедных дозиметров в спектрах различной жесткости из работы [7].

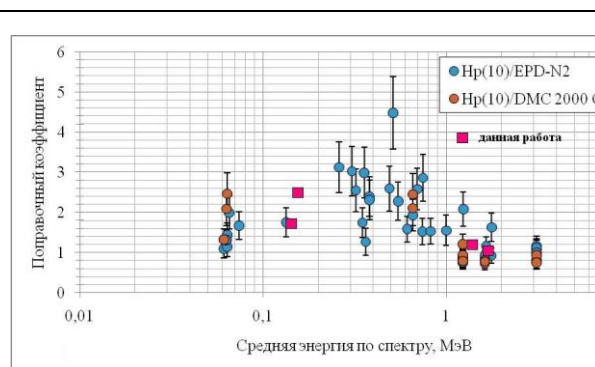


Рис.6 - Поправочные коэффициенты для электронных прямопоказывающих дозиметров в спектрах различной жесткости из работы [7].

Таблица 3.

Отношение показаний дозиметров радиометров ДКС96/МКС-АТ1117.

| место измерения  | расчет по спектру нейтронов | измеренная величина |
|--|-----------------------------|---------------------|
| ГО – Помещение машины осмотра корпуса реактора;              | 1,4                         | 2*                  |
| ГО помещение, рядом с ГЦНА                                   | 1,5                         | 2*                  |
| помещение настройки концентраторов бора в 60 см от источника | 1                           | 1.                  |
| помещение концентраторов бора настройки на рабочем столе     | 1,2                         | 1,2                 |

- результаты измерений в аналогичных условиях на 1-м энергоблоке Нововоронежской АЭС-2.

Используя результаты измерения спектров нейтронов в ГО Балаковской АЭС выполнен расчет показаний . ДКС96Н и МКС-АТ1117 дозиметров в полях нейтронов. ДКС96Н завышает МАЭД на 10...20%, МКС-АТ1117- занижает на 20...30%. Расчетная разница в показаниях ДКС96Н и МКС-АТ1117 может достигать 40...50%. Расчетные результаты не противоречат экспериментальным

данным. Результаты измерений ( Нововоронежская АЭС, БН-800 и др.) показывают, что отношение показаний ДКС96Н/МКС-АТ1117 может составлять от 1,5 до 2,5.

В таблице 4 приведены расчетные величины поправок для дозиметров 6776/8806 в помещениях Балаковской АЭС [4].

Таблица 4

Расчетные величины поправок для дозиметров 6776/8806 в помещениях Балаковской АЭС [4].

| Точка измерения  | Величина поправки F |
|--|---------------------|
| Помещение (здание спецкорпуса) настройки и ремонта концентраторов боа. Рядом с настроечным стендом, источник в рабочем положении | 0,308               |
| Там же, источник в 60 см от точки измерения  | 0,638               |
| Там же, на рабочем столе   | 0,251               |
| Помещения пристройки к зданию реактора , источники в рабочем положении в концентротомерах  | 0,323               |
|  | 0,272               |
|  | 0,243               |
|  | 0,263               |
| ТК13. Спектр нейтронов утечки с поверхности  | 0,0308              |
| Спектр нейтронов утечки с поверхности ТК13 в бетонном колодце  | 0,0334              |
| Спектр нейтронов утечки с на 1 м от поверхности ТК13 в бетонном колодце  | 0,0231              |
| Гермообъем, помещение ГЦНА   | 0,082               |
| Гермообъем, помещение машины осмотра корпуса реактора  | 0,086               |



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенной работы получены поправки для измерения индивидуального эквивалента дозы при облучении нейтронами персонала Балаковской АЭС помещениях постоянного и временного пребывания. Поправки можно сгруппировать в 3 группы: помещения гермообъема, помещения для работ с радионуклидными нейтронными источниками, помещения и зоны, где находятся транспортные контейнеры с ОЯТ. Поправочные коэффициенты, полученные на основе расчета данных по энергетической зависимости чувствительности и измеренных спектров нейтронов находятся в согласии с данными непосредственных измерений.

Выполнены расчеты поправочного коэффициента для термолюминесцентного дозиметра Harshaw 6776/8806 с использованием результатов измерений спектров нейтронов. Расчетные величины поправочного коэффициента лежат в диапазоне от 0,0231 до 0,638.

Для работ с источниками ИБН7(9) рекомендуется использовать значение поправочного коэффициента равное 0,3.

Для работ в гермообъеме на мощности рекомендуется использовать значение поправочного коэффициента равное 0,10;.

Для работ рядом с ТК13 с ОЯТ рекомендуется использовать значение поправочного коэффициента равное 0,03.

Так как дозиметры DMC2000GN используются только для оперативной оценки условий работы, то значения поправочного коэффициента можно учитывать, только при выполнении работ в условиях ГО, принимая значение  $F=2$ .

Различие в чувствительности к «мягким» нейтронам (энергии ниже 0,1 МэВ) для дозиметров-радиометров ДКС96Н и МКС-АТ-1117 необходимо учитывать при проведении обследования радиационной обстановки в помещениях реактора, если при таких измерениях используются оба средства измерения. При этом учитывая, что международный стандарт МЭК 61005[13] допускает в п.6.4.2 о возможном изменении относительных откликов при изменении энергий от тепловых до 50 кэВ - от 0,2 до 8,0.

Работа выполнена в рамках контракта ООО «АтомПромИнжиниринг» и Балаковской АЭС, при поддержке А.Ю.Соколова (ген. директора ООО «АПИ»). Отдельная благодарность Е.А.Зотову и Е.С.Зыковой (БалАЭС) за помощь в измерениях, К.Нурлымбаеву за полезные замечания.

## ССЫЛКИ:

1.«Дозиметрия. Определение индивидуальной эффективной дозы нейтронного излучения». Методические указания МУ 2.6.5.052-2017. Методическое обеспечение радиационного контроля в атомной отрасли. Том.5. Москва. 2018.

2.МУ 2.6.5.028-2016. Определение индивидуальных эффективных и эквивалентных доз и организация контроля профессионального облучения в условиях планируемого облучения. Общие требования.

3.МУ 2.6.5.026-2016 Дозиметрический контроль внешнего профессионального облучения. Общие требования.

4.А.Г.Алексеев, П.А.Алексеев. Спектры нейтронов на рабочих местах персонала Балаковской АЭС // Журнал «Евразийский Союз Ученых. Технические науки». 2020/02/17; № 70(2):20-26. DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2020.2.70.534

5.А.Г.Алексеев, В.А.Пикалов, О.В.Суманев, Е.В.Косьяненко, Г.И.Бритвич, Е.Г.Спириков, Н.В.Кирикова, С.А.Глазунов, В.В.Александров, С.Ф.Пономарев, А.П.Куликов, П.Ф.Масляев/ «Измерение спектров нейтронного излучения на рабочих местах разделительного производства завода по обогащению урана», журнал «АНРИ», №4, 2005г., стр.49-60.

6.А.Г.Алексеев, П.А.Алексеев, А.А.Янович-Измерение спектров нейтронов за биологической защитой реакторов и ускорителя НИЦ «Курчатовского института»-DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2019.6.67.378- Журнал «Евразийский Союз Ученых (ЕСУ) №10,(67), 2019 стр.10-16.

7.П.П.Ганцовский, А.Г.Цовьянов, А.Г.Алексеев, Ю.С.Степанов / Использование экспериментально-расчетного метода для калибровки нейтронных индивидуальных дозиметров различных типов на рабочих местах радиационно-опасных производств. Журнал АНРИ №4, 2016г.

8.Алексеев А.Г., Масляев П.Ф./ «Сравнительные испытания индивидуальных электронных прямопоказывающих нейтронных дозиметров.»/ журнал «АНРИ», №1,Стр.54–59, 2008.

9.N. Tsujimuraa\*, T. Yoshidaa , C. Takadaa , T. Nunomiyab and K. Aoyamab Responses of commercially available neutron electronic personal dosimeters in neutron fields simulating workplaces at MOX fuel fabrication facilities. Radiation Measurements 46(12):1720-1723 December 2011

10.Deepika J.,Panchapakesan S. /A Study on the Response of Electronic Dosimeters to Mixed Neutron-Gamma Radiation Fields. Conference: National Symposium of the Indian Association for Radiation Protection, IARPNC-2014, March 2014

11.S.MayeraM.BoschungH.HoedlmoseraTh.BuchillierbC.BailatbB.Bitterlic Intercomparison of the response of different photon and neutron detectors around a spent fuel cask Radiation Measurements. Volume 47, Issue 8, August 2012, Pages 634-639.

12.Denise B. Pelowitz, MCNPX User's ManualVersion 2.6.0, April 2008 LA-CP-07-1473.

13.IEC 61005:2014. INTERNATIONAL STANDARD. Radiation protection instrumentation – Neutron ambient dose equivalent.